

# 既製開孔補強製品を用いた大開孔を有する基礎梁の曲げせん断実験

## — 高強度開孔補強金物の影響 —

### Shear Behavior of Reinforced Concrete Foundation Beams with a Large Web Opening using Opening Reinforcement Hardware

#### - The Effects of High Strength Opening Reinforcement Hardware -

五十嵐治人\*1

#### 概 要

鉄筋コンクリート(以下、RC)造の梁に設備配管を通す等、円形開孔を設ける場合、その直径は梁せいの1/3以下に抑えることが一般的である。それに従った場合、基礎梁に設ける最大の円形開孔としては、人間が作業用に使用する人通孔が挙げられるが、この直径は最低でも600mm必要となるため、梁せいはその3倍の1,800mm以上となる。しかしながら、構造耐力上はこれほどの断面が必要でない場合が少なくない。これについて、基礎梁の断面の省力化が可能となれば、躯体量は勿論、掘削量も低減でき、コストダウン、工期短縮、環境負荷低減につながることを期待できる。

本研究は、昨年に引き続き構造性能確認実験結果を考察し、特に既製開孔補強金物に高強度鉄筋を使用した場合の耐力、変形性能に着目した結果について報告する。高強度鉄筋は、降伏点強度が高く、部材が終局状態に至るまで降伏しない傾向があり、その際の評価方法に着目した。

key words : 鉄筋コンクリート、基礎梁、貫通孔、高強度せん断補強筋、構造性能確認実験

#### 1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の基礎梁を省力化する目的で、梁せいの1/3を超える開孔を有する試験体の実験を昨年より実施した。その結果、開孔径/梁せいを1/2.5としても、従来の設計式を用いて安全側に評価できることを確認した。ただし、昨年までは既製開孔補強金物(以下、金物)は普通強度鉄筋を用いたもの(以下、普通強度金物)のみを対象としていた。今年は新たに、高強度鉄筋を用いた金物(以下、高強度金物)を用いた場合の結果について報告する。高強度金物を使用した場合、終局に至るまで降伏しないことが多く、せん断耐力を評価した際の傾向について、検討した結果を報告する。

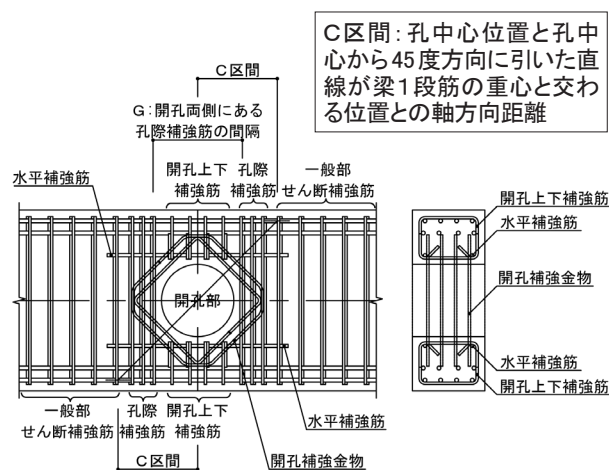


図-1 開孔部の補強方法

#### 2. 実験概要

##### 2.1 試験体

図-1にプロトタイプである試験体No. 3の開孔周囲の配筋補強状況を示す。一般部の配筋の詳細は前報<sup>1)</sup>に示す。試験体一覧を表-1に示す。この中で、本報では高強度金物の効果に着目するため、8体のうち、試験体No. 3、5、6、7に着目して検討した。

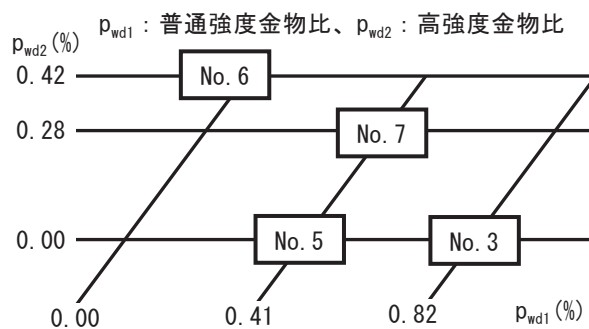


図-2 各試験体の  $p_{wd}$  に関する相関

\*1 Haruhito IGARASHI

表-1 試験体一覧

試験体	共通事項	Fc	H/D	開孔補強金物	開孔上下補強筋	■ 孔際補強筋比: $p_{ws} = \frac{a_s}{b \cdot C}$ ■ 開孔補強金物比: $p_{wd} = \frac{n_d \cdot a_d \cdot \sqrt{2}}{b \cdot C}$ $P_{wd1}$ : 普通強度開孔補強金物比 $P_{wd2}$ : 高強度開孔補強金物比 試験体 No. 7: $p_{wd1}=0.41\%$ 、 $p_{wd2}=0.28\%$ ■ 開孔部補強筋比: $p_{wo} = p_{ws} + p_{wd}$ ■ 開孔上下補強筋比: $p_o = \frac{a_o}{b \cdot G}$ $a_s$ : C区間に配筋される孔際補強筋の全断面積 $a_d$ : C区間に対応する開孔補強金物の計算用断面積 $n_d$ : 開孔補強金物の枚数 $a_o$ : 開孔上下補強筋上下各々の全断面積 $b$ : 梁幅、 $C$ : C区間長さ $G$ : 開孔両側にある孔際補強筋の間隔
No. 1	梁幅 b=300 梁せい D=750mm 有効せい d=680mm	36	1/3	D10 4枚 ( $p_{wd1}=0.82\%$ )	2-D10 2組 ( $p_o=0.30\%$ )	
No. 2					2-D10 2組 ( $p_o=0.26\%$ )	
No. 3	内法スパン $L_o=2250\text{mm}$	21	1	D10 2枚 ( $p_{wd1}=0.41\%$ )	2-D10 4組 ( $p_o=0.51\%$ )	
No. 4	せん断スパン比 $M/(Qd)=0.5L_o/d=1.65$					
No. 5	主筋 4/4-D16 上下端 ( $p_t=0.78\%$ )	36	2.5	S8 3枚 ( $p_{wd2}=0.42\%$ )		
No. 6	一般部せん断補強筋 4-D10@90 ( $p_w=1.06\%$ )					
No. 7	孔際補強筋 4-D10 3組	36	1	D10 2枚 S8 2枚		
No. 8	( $p_{ws}=0.86\%$ )			D10 4枚 ( $p_{wd1}=0.82\%$ )		2-D10 5組 ( $p_o=0.57\%$ )

表-1 中、本報で検討しない試験体は網掛けで示した。これら 4 体の試験体の普通強度金物比  $p_{wd1}$ 、高強度金物比  $p_{wd2}$  の相関関係を図-2 に示す。これらについて以下の点に着目した。

- 1) 試験体 No. 5 と No. 6: 金物比がほぼ同一で、金物強度が異なる試験体同士の比較。
- 2) 試験体 No. 3 と No. 6 と No. 7: 普通強度金物のみ、高強度金物のみ、普通強度金物と高強度金物が混在したもので、式(1) (2.2 参照)による開孔部せん断耐力  $Q_{SU0}$  がほぼ同一の試験体同士の比較。

2.2 せん断耐力  $Q_{SU0}$  算定式

式(1)は、慣行的に使用されている開孔部のせん断耐力式である。孔際補強筋、金物に高強度鉄筋を使用した場合は、コンクリート圧縮強度  $\sigma_B$  に応じて降伏強度を低減する。試験体 No. 6、No. 7 の高強度金物の式(1)における降伏強度は、式(2)により各々  $900\text{N/mm}^2$ 、 $784\text{N/mm}^2$  となった。高強度鉄筋 S8 の材料試験結果による降伏強度は  $1011\text{N/mm}^2$ 、降伏ひずみは  $4830\mu$  (何れも 0.2% オフセット法)であった。このため、S8 の規格降伏点は  $785\text{N/mm}^2$  であるが、試験体 No. 6 における S8 の降伏点強度は、式(2)よりコンクリート強度から決まる  $900\text{N/mm}^2$  として扱う。その他の材料試験結果は、表-2 に示す。

各試験体のコンクリート圧縮強度、引張強度、ヤング率を表-3 に示す。表-1 と同様に、本報で検討対象としない試験体は網掛けで示す。

表-2 鉄筋引張試験結果

種類		降伏点	降伏ひずみ	ヤング率
		N/mm <sup>2</sup>	$\mu$	N/mm <sup>2</sup>
梁主筋	D16	987	5208	190000
	D16a	1058	5687	186000
水平補強筋	D13	370	2010	184000
その他	D10	375	2090	179000
	S8	1011	4830	209000

\*梁主筋、S8 の降伏点は 0.2% オフセット耐力  
 \*D16 は試験体 No.1~No.5、D16a は No.6~No.8  
 \*その他: せん断補強筋、孔際補強筋、開孔補強金物、開孔上下補強筋、S8 は No.6、No.7 の開孔補強金物のみを使用

$$Q_{SU0} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (\sigma_B + 18)}{M/(Qd) + 0.12} \left( 1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{p_{wd} \cdot \sigma_y + p_{ws} \cdot \sigma_y} \right\} b \cdot j \quad (1)$$

ここで、j: 応力中心間距離(mm)で、 $0.875d$  とする。

$ws \sigma_y$ : 孔際補強筋強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$wd \sigma_y$ : 金物強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$ws \sigma_y$ 、 $wd \sigma_y$  は式(2)-1~3 に従う。

$$ws \sigma_y \setminus wd \sigma_y = 20 \sigma_B : \sigma_B < 27\text{N/mm}^2 \quad (2)-1$$

$$ws \sigma_y \setminus wd \sigma_y = 40 \sigma_B - 540 : 27 \text{N/mm}^2 \leq \sigma_B < 36\text{N/mm}^2 \quad (2)-2$$

$$ws \sigma_y \setminus wd \sigma_y = 25 \sigma_B : \sigma_B \leq 36\text{N/mm}^2 \quad (2)-3$$

3. 実験結果

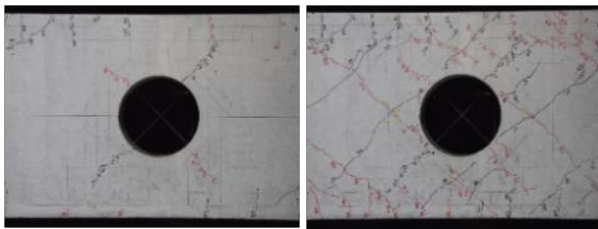
3.1 ひび割れ状況

試験体 No. 3、No. 5、No. 6、No. 7 の  $R=2.5/1000\text{rad}$ . ① 載荷（正側）時、 $R=-5/1000\text{rad}$ . ② 載荷（負側）時、および最終破壊時のひび割れ状況を写真-1~4 に示す。ここで①、②は各々1回目載荷時正側、2回目載荷時負側のピーク時を示す。これらは各々、長期荷重を受けている状態、短期荷重を受けた後の状態を想定して示した。この他、タイトルには各試験体の普通強度金物比、高強度金物比を併せて示す。最終破壊状況は試験体全体のひび割れ状況、正側、負側加力の方向も併せて示す。その他は開孔周囲のひび割れ状況のみを示す。正負の加力方向は全て同一方向である。全試験体とも最後は正側加力方向に押し切った。各試験体ともひび割れは梁端部曲げ、開

孔中心から45度方向、梁端部せん断、開孔接線方向の順に発生し、開孔接線方向ひび割れの拡大・伸展が顕著となり、端部が曲げ降伏する前に最大耐力に達した。全試験体とも開孔部のせん断破壊が先行しており、いずれの試験体ともほぼ最終破壊状況は同様の性状を示した。

表-3 コンクリート試験結果

試験体	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	割裂強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング率 N/mm <sup>2</sup>
No. 1	37.8	2.65	28,500
No. 2	38.6	2.66	29,600
No. 3	40.1	2.71	29,600
No. 4	23.7	2.21	26,700
No. 5	36.0	2.60	29,500
No. 6	36.0	2.60	29,700
No. 7	33.1	2.38	29,400
No. 8	33.7	2.41	29,400

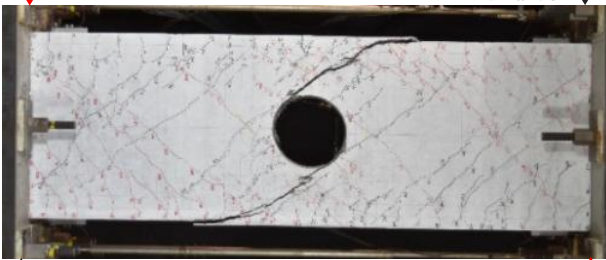


R=2.5/1000①時

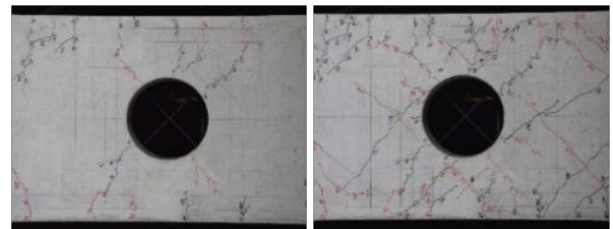
R=-5/1000②時

▼ 負側載荷

正側載荷 ▼



最終破壊状況 ( $p_{wd1}=0.82\%$ )  
写真-1 試験体 No. 3 ひび割れ状況

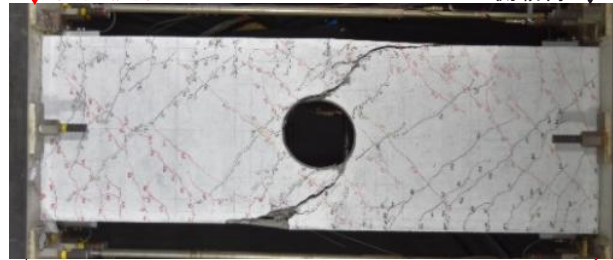


R=2.5/1000①時

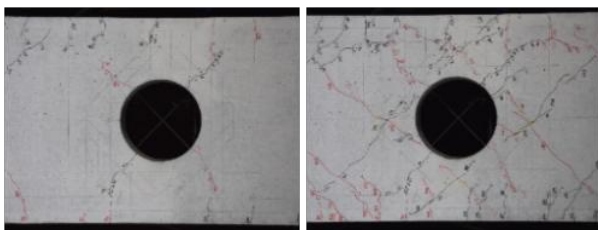
R=-5/1000②時

▼ 負側載荷

正側載荷 ▼



最終破壊状況 ( $p_{wd1}=0.41\%$ )  
写真-2 試験体 No. 5 ひび割れ状況

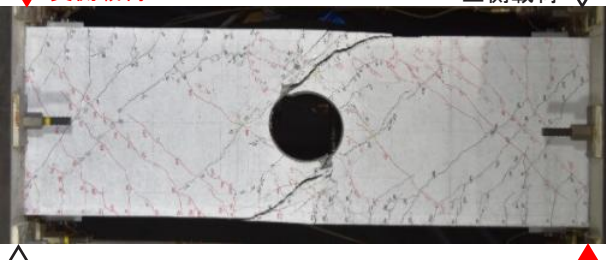


R=2.5/1000①時

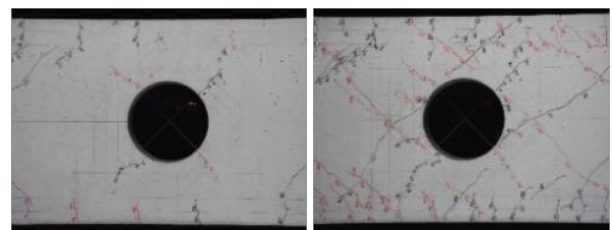
R=-5/1000②時

▼ 負側載荷

正側載荷 ▼



最終破壊状況 ( $p_{wd2}=0.42\%$ )  
写真-3 試験体 No. 6 ひび割れ状況



R=2.5/1000①時

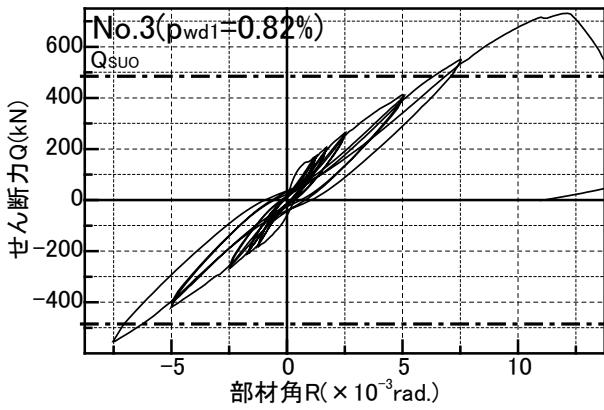
R=-5/1000②時

▼ 負側載荷

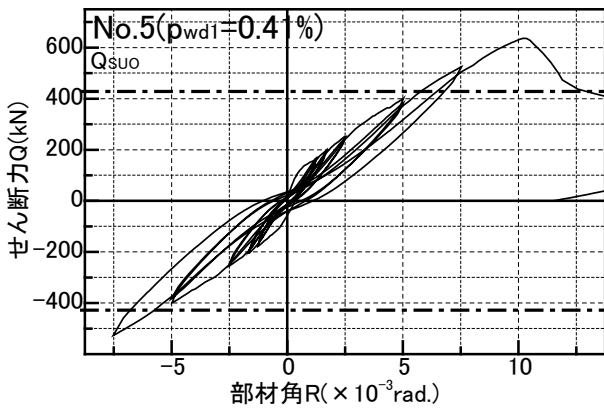
正側載荷 ▼



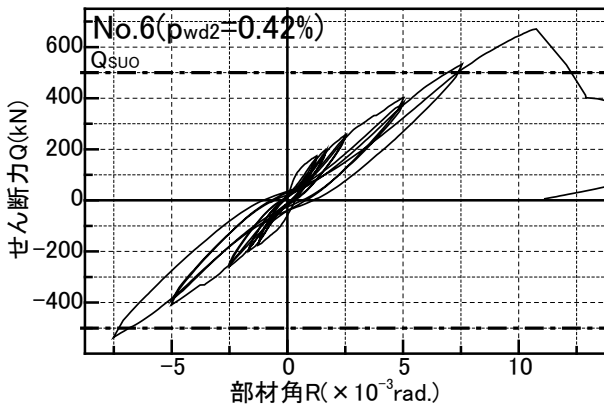
最終破壊状況 ( $p_{wd1}=0.41\%$ ,  $p_{wd2}=0.28\%$ )  
写真-4 試験体 No. 7 ひび割れ状況



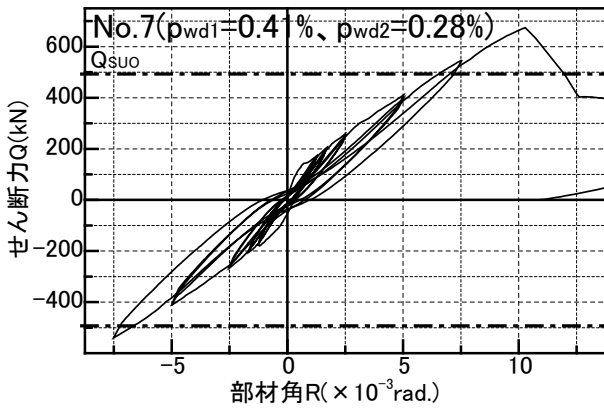
(a) 試験体 No. 3



(b) 試験体 No. 5



(c) 試験体 No. 6



(d) 試験体 No. 7

図-3 実験結果 Q-R 関係

最終破壊性状に対して金物比、金物強度の影響は軽微であった。R=2.5/1000①時、R=-5/1000②時では、以下の傾向が見られた。

- 1) R=2.5/1000rad. ①時における開孔周囲のひび割れによる損傷は、No. 5 が最も著しかった。No. 6 は No. 5 とほぼ同等の  $p_{wd}$  であるが、ひび割れ性状はむしろ No. 3、No. 7 と同様であった。
- 2) R=-5/1000rad. ②時における開孔周囲のひび割れによる損傷は、No. 5 が他の試験体よりも若干著しく、No. 7 が最も軽微であった。

### 3.2 試験体せん断力 Q-部材角 R 関係

図-3(a)~(d)に、各試験体のせん断力 Q-部材角 R 関係を示す。式(1)によって算出される開孔部せん断耐力  $Q_{suo}$ 、普通強度金物比  $p_{wd1}$ 、高強度金物比  $p_{wd2}$  を併せて示す。図中に示したせん断耐力計算値  $Q_{suo}$ 、実験結果最大せん断力  $Q_{max}$ 、および余裕度 ( $Q_{max}/Q_{suo}$ ) を表-4 に示す。図-3 のうち、正側載荷について、各試験体の包絡曲線を比較した結果を図-4 に示す。式(1)、(2)のよるせん断耐力  $Q_{suo}$  を併せて示す。これらによると、以下のことが言える。

- 1) R=7.5/1000 に至るまでの Q-R 関係は、全試験体ともほぼ同様の性状を示した。このレベルの部材角までは金物比の影響は殆ど見られなかった。R=7.5/1000 時、R=-7.5/1000 時何れの加力サイクルにおいても、ピーク時には式(1)によるせん断耐力  $Q_{suo}$  を超える耐力を生じていた。

表-4  $Q_{suo}$  と実験結果  $Q_{max}$  の比較

試験体	金物比 (%)		せん断力 (kN)		耐力余裕度 $Q_{max}/Q_{suo}$
	$p_{wd1}$	$p_{wd2}$	$Q_{suo}$	$Q_{max}$	
No. 3	0.82	—	485	732	1.51
No. 5	0.41	—	428	636	1.49
No. 6	—	0.42	500	671	1.34
No. 7	0.41	0.28	493	674	1.37

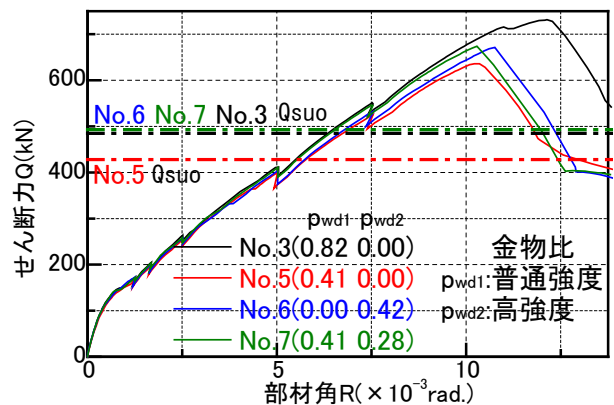


図-4 実験結果正側載荷時包絡曲線

2) 金物比の最も大きい No. 3 は最大耐力、最大耐力生起部材角とも最も大きかった。耐力は No. 3、No. 7、No. 6、No. 5 の順で、 $p_{wd}$  が大きい試験体ほど高かった。普通強度金物が SD345、高強度金物が 785 級、コンクリート圧縮強度が  $36\text{N/mm}^2$  程度である場合、 $p_{wd}$  の大きい方が、耐力も高い傾向にあった。

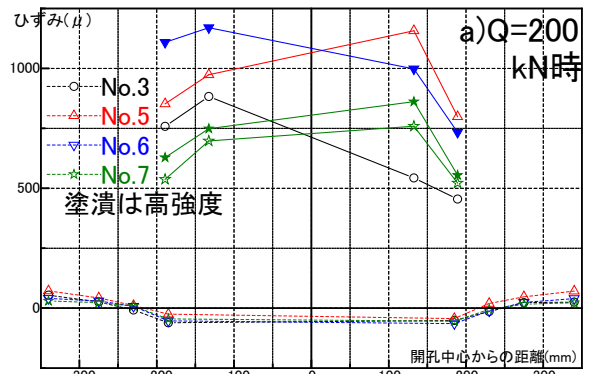
3) 試験体 No. 3 は、 $Q_{S10}$  が No. 6、No. 7 とほぼ同様となる試験体であるが、実験結果の最大耐力は双方に対して 8%、最大耐力変形角は 13%以上大きかった。

4) 耐力余裕度は No. 3 と No. 5 は約 1.5、No. 6 と No. 7 は約 1.35 であった。高強度金物を使用した試験体は耐力余裕度が小さい結果となった。

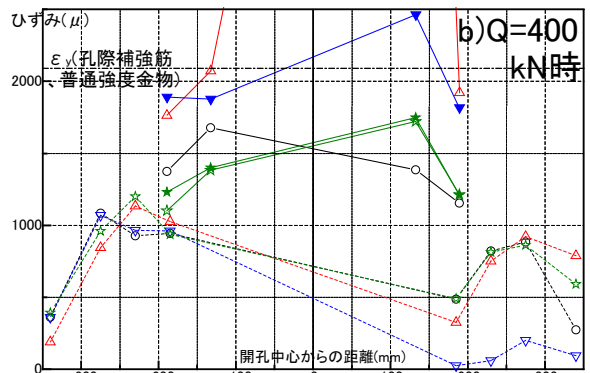
5) 試験体 No. 6 と No. 7 の最大耐力実験値、および  $Q_{S10}$  はほぼ同様の値を示したが、最大耐力時 R は No. 6 の方が No. 7 より 4.5%程度大きかった。

### 3.3 孔際補強筋、金物のひずみ

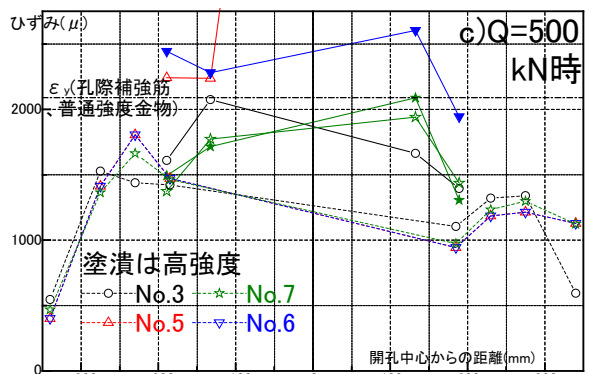
図-5(a)~(e)に、各試験体の同一せん断力時の孔際補強筋、金物のひずみ分布を比較した結果を示す。これらは試験体が正側荷重時に初めてこのせん断力を経験したステップのひずみを示す。図中、塗潰しの凡例は高強度金物のひずみを示す。普通強度、高強度金物を併用した試験体 No. 7 は双方の金物のひずみを示す。孔際補強筋のひずみは点線で、金物のひずみは実線で、各々結んで示す。せん断力は、(a) 200kN：概ね長期許容せん断力時、(b) 400kN：概ね短期許容せん断力時、(c) 500kN：概ね式(1)によるせん断耐力時、(d) 600kN：破壊直前の状況、(e) 670kN (No. 5 は 630kN)：最終破壊状態、の 5 水準とした。また、e) には試験体 No. 6、No. 7 に使用した高強度金物のひずみについて、式(1)に使用した降伏点強度時のひずみを括弧内に、実際に生じている最大ひずみを括弧の外に併記する。これらによると、以下のことが言える。



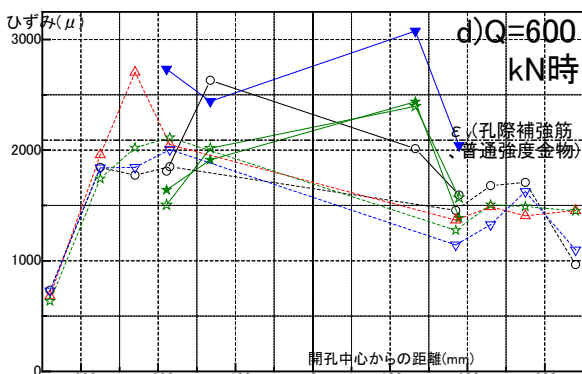
(a) Q=200kN 時



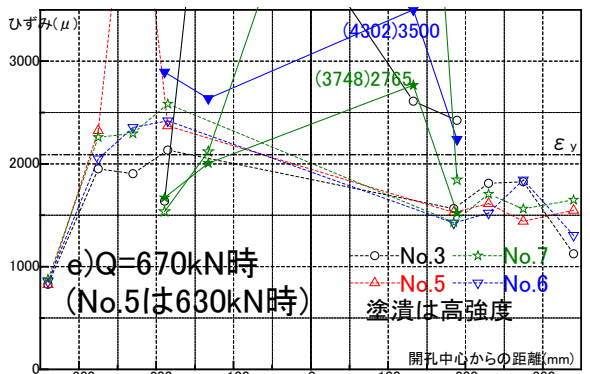
(b) Q=400kN 時



(c) Q=500kN 時



(d) Q=600kN 時



(e) Q=670 (No. 5 は 630) kN 時

図-5 同一せん断力時孔際補強筋、金物ひずみ分布

- 1) a)より、低いせん断力レベルでは孔際補強筋よりも金物のひずみが大きいことから、金物は小変形時のひび割れ発生の抑止に寄与しているものと考えられる。
- 2) b)より、試験体 No.5 の金物は  $R=5/1000\text{rad}$ 、時相当の  $Q=400\text{kN}$  時には降伏している。これは写真-1 に示した開孔周囲のひび割れによる損傷が、No.5 が最も著しかったことと符合する。
- 3) a)～d)より、試験体 No.7 は普通強度金物が降伏するまでは高強度金物とほぼ同様のひずみ分布を示した。
- 4)  $p_{rd} \approx 0.41\%$  とほぼ等しい試験体 No.5 と No.6 では、耐力は No.6 の方が大きかった。これは b)～e)より、No.5 は金物が降伏しているのに対し、No.6 は高強度金物であり降伏していないためであると考えられる。
- 5) 試験体 No.6 と No.7 は  $Q_{SU0}$ 、 $Q_{max}$  とともにほぼ同様であるが、 $Q_{SU0}$  を式(1)により算定した際の高強度金物の降伏強度時ひずみは No.6:  $4302\mu$ 、No.7:  $3748\mu$  である。これらはいずれも e)に示すひずみより大きく、 $Q_{SU0}$  算定時の高強度金物の降伏点強度の評価には課題が残った。

#### 4. まとめ

金物比、金物の降伏強度をパラメータとした大開孔 RC 基礎梁実験結果を用いて検討を行った。この結果、いずれの試験体も金物が、微少変形時には孔際補強筋よりも有効に、損傷を受けてから破壊に至るまでは孔際補強筋とともに開孔部耐力の向上に寄与していることが分かった。しかしながら、提案した開孔部せん断耐力式による算定値は、金物に高強度鉄筋を使用すると実験結果に対する余裕度が小さくなり、今後はこれらの定量的な評価方法について検討を進める予定である。

#### 【謝辞】

本研究は、鴻池組、清水建設、東急建設、コーリョー建販との共同で実施した。論文作成にあたり、多大なご助言を頂いた関係各位に深甚なる謝意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) 五十嵐治人「既製開孔補強製品を用いた大開孔を有する基礎梁の曲げせん断実験」 2017 錢高組技報
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010